Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Simulation of Viscoelastic Fluid Mixing in a T-Y Shaped Micromixer

Research Article

Fatemeh Khalilian[1], Morteza Bayareh[2]

10.22067/jacsm.2024.87529.1248

Abstract

The current study analyzes the dynamics of the mixing flow of two viscoelastic fluids in a novel T-Y micromixer. An aqueous solution with 10% polyethylene glycol with a molecular weight of 8000 and 0.1% polyethylene oxide with a molecular weight of 2000000, which is a Boger fluid, is selected as a viscoelastic fluid. Using the COMSOL Multiphysics software, the mixing of two viscoelastic fluids will be investigated numerically using the Oldroyd-B constitutive equation. The effect of the inlet velocity, ratio of inlet velocities, and Weissenberg number on mixing efficiency and pressure drop will be presented. The results show that the elastic effect in viscoelastic fluid flow is the main factor in increasing mixing index. At a distance of 2800 μm from the beginning of the main channel, the mixing index reaches from about 46% for the inlet velocity of 0.002 m/s to about 38% for the inlet velocity of 0.006 m/s. With the increase of the Weissenberg number, the mixing index is increased in different cross-sections of the microchannel, because the instability of the viscoelastic fluid is enhanced at higher Weissenberg numbers. Also, it is demonstrated that the mixing index is reduced by decreasing the velocity ratio. Pressure drop is augmented with velocity, Weissenberg number, and velocity ratio.

Keywords: Microfluidics, T-Y micromixer, Viscoelastic fluid, Weissenberg number, Mixing index.

1. Introduction

Micromixers are widely used in medicine, chemical industry, drug delivery, chemical processes, such as biodiesel production, as well as in the investigation of disease-causing factors, genetic structure, isolation and diagnosis of cells, and synthesis of organic substances. Micromixers are divided into two groups of active and passive ones. In passive micromixers, mixing is done by the interaction of the flow with different structures, such as curved channels, zigzag, etc., without applying any external energy. In active micromixers, mixing is performed by external actuators, such as electric field, magnetic field, etc. Cortes-Quiroz et al. numerically assessed mixing in a three-dimensional T-shaped micromixer at Re = 100-500. This study showed that the 3D micromixer provides a significant increase in mixing and a lower pressure drop compared to a conventional T-shaped micromixer over the entire range of Reynolds numbers. Ansari et al. examined mixing in a microchannel with asymmetric subchannels for Re = 1-80 and found that rhomboid subchannels have higher mixing efficiency when the width of the main channel is three or four times the width of the subchannel.

A review of previous papers shows that the mixing of viscoelastic fluids has rarely been the focus of researchers. In addition to introducing the T-Y shape micromixer (Fig. 1), the present work examines the mixing of two viscoelastic fluids numerically using the Oldroyd-B constitutive equation. The effect of the inlet velocity, the ratio of inlet velocities, and Weissenberg number on mixing efficiency is evaluated.

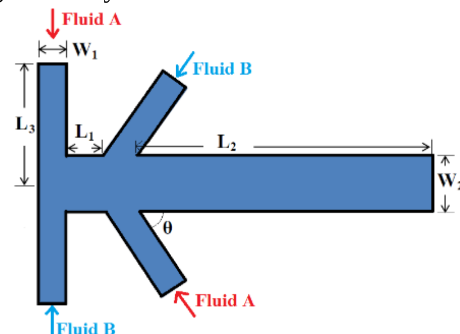


Fig. 1. Schematic of T-Y micromixer
(W_2 = 400 μm, W_1 = 200 μm, L_2 = 3600 μm, and L_3 = 1400 μm).

2- Governing equations

The governing equations of the mixing process of two viscoelastic fluids, i.e., continuity and momentum equations are expressed as follows by assuming incompressible, unsteady, and laminar fluid flow:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \qquad (1)$$

*Manuscript received: August April 8, 2024. Revised, April 20, 2024, Accepted, May 8, 2024.

[1] Master Student, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Email: m.bayareh@sku.ac.ir

[2] Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}+\ \mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}\right)=-\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau} \tag{2}$$

where **u** is the velocity vector, ρ is the density, P is the pressure and τ is the sum of the shear stress tensor of the solvent (τ_s) and the elastic solution (τ_p):

$$\tau=\tau_s+\tau_p \tag{3}$$

$$\tau_s=\eta_s[\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^T] \tag{4}$$

In this equation, η_s is the dynamic viscosity of the solvent. The solution shear stress tensor is modeled using constitutive equations of viscoelastic fluids, such as Oldroyd-B:

$$\tau_p+\lambda\left[\frac{\partial\tau_p}{\partial t}+\nabla\cdot(\mathbf{u}\tau_p)-(\mathbf{u}\tau_p)^T\cdot\tau_p-\tau_p\cdot(\nabla\mathbf{u})\right]=\eta_p[\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^T] \tag{5}$$

where λ is the relaxation time of the viscoelastic fluid and η_p is the dynamic viscosity of the solution.

Reynolds and Weissenberg numbers are respectively defined as follows:

$$\mathrm{Re}=\frac{u_{in}D}{\eta_o} \tag{6}$$

$$\mathrm{Wi}=\frac{u_{in}\lambda}{D} \tag{7}$$

The mixing index is calculated using the following relationship:

$$MI=1-\sqrt{\frac{\iint(c-\bar{c})^2\,dA}{A\bar{c}(c_{\max}-\bar{c})}} \tag{8}$$

The mixing index is the average concentration in the cross-section of the outlet channel. A is the cross-section of the outlet channel and c_{max} is the maximum sample concentration in the microchannel. The mixing index of zero and 1 indicates no mixing and complete mixing, respectively.

3- Results

The effect of inlet velocity

The simulations are carried out for the Weissenberg number equal to 0.1. According to Eq. (7), to keep the Weissenberg number constant, the relaxation time should be changed appropriately. Fig. 2(a) shows the mixing efficiency at different distances from the channel length for different inlet velocities and Fig. 2(b) shows the pressure drop values for different velocities. It can be observed that at a certain distance from the channel, the mixing efficiency decreases with the enhancement of the inlet velocity. The concentration contours confirm that the mixing quality is increased along the channel, but the amount of this enhancement is not significant for different velocities. As Fig. 2(b) shows, at a distance of 2800 micrometers from the beginning of the main channel, the mixing index is improved from about 46% for the inlet velocity of 0.002 m/s to about 38% for the inlet velocity of 0.006 m/s.

The effect of Weissenberg number

With the increase of the Weissenberg number, the mixing index is augmented in different sections of the microchannel, because the instability of the viscoelastic fluid increases at higher Weissenberg numbers. In general, turbulent flow movements are continuously created at the junction of inlets. The turbulent flow is first created at the junction of the inlets. After that, in the straight channel, unlike the layered state in Newtonian fluids, the flow of viscoelastic fluids with different concentrations moves more irregularly.

4- Conclusion

In addition to introducing the T-Y shape micromixer, the present work examines the mixing of two viscoelastic fluids numerically using the Oldroyd-B constitutive equation. The results demonstrate that at a certain distance from the channel, due to the instability of fluid flow, the mixing efficiency is improved by reducing the inlet velocity. For example, at a distance of 2800 μm from the beginning of the main channel, the mixing index reaches from about 46% for the inlet velocity of 0.002 m/s to about 38% for the inlet velocity of 0.006 m/s. With the increase of the Weissenberg number, the mixing index augments in different sections of the microchannel, because the instability of the viscoelastic fluid is enhanced at the higher Weissenberg numbers. At a certain distance from the channel, the mixing efficiency is diminished with the increase of the inlet velocity. In general, the increase in mixing efficiency is due to the destabilization of fluid flow.

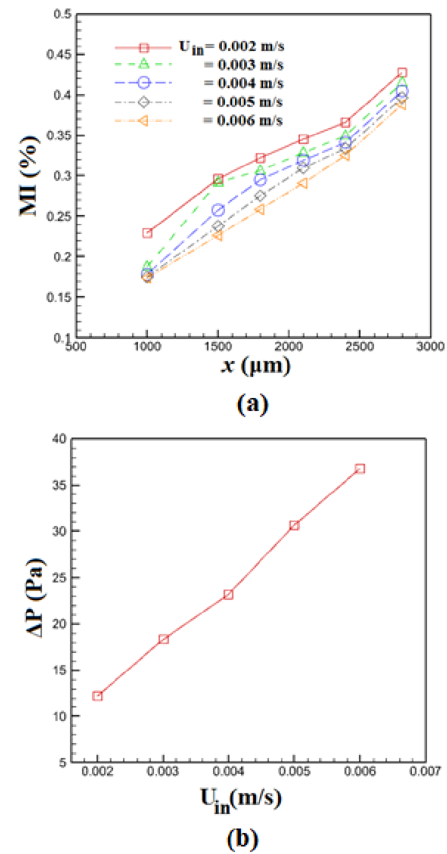


Fig. 2. The effect of the inlet velocity on (a) the mixing index and (b) pressure drop.



علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



شبیه‌سازی عددی اختلاط سیالات ویسکوالاستیک در یک میکرومیکسر T-Y شکل*

مقاله پژوهشی

فاطمه خلیلیان [(۱)] مرتضی بیاره [(۲)] 

10.22067/jacsm.2024.87529.1248

چکیده *پژوهش حاضر، دینامیک جریان اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک یک میکرومیکسر T-Y شکل جدید را تحلیل می‌کند. محلول آبی با ۱۰٪ پلی‌اتیلن گلایکول با وزن ملکولی ۸۰۰۰ و ۰/۱٪ پلی‌اتیلن اکساید با وزن ملکولی ۲۰۰۰۰۰۰ که یک سیال بوگر است به عنوان سیال ویسکوالاستیک انتخاب می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس، اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک به صورت عددی و با استفاده از معادله ساختاری اولدروید ـ بی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تأثیر سرعت ورودی یکسان، نسبت سرعت‌های ورودی و عدد وایزنبرگ بر بازده اختلاط ارزیابی و میزان افت فشار محاسبه و ارائه خواهد شد. نتایج نشان دادند اثر الاستیک در جریان سیال ویسکوالاستیک عامل اصلی افزایش اختلاط است. در فاصله ۲۸۰۰ میکرومتری از ابتدای کانال اصلی، شاخص اختلاط از حدود ۴۶٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه به حدود ۳۸٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۶ متر بر ثانیه می‌رسد. با افزایش عدد وایزنبرگ، شاخص اختلاط در مقاطع مختلف میکروکانال افزایش یافت زیرا در اعداد وایزنبرگ بزرگ‌تر، ناپایداری سیال ویسکوالاستیک بیشتر می‌شود. همچنین، نشان داده می‌شود که با کاهش نسبت سرعت، شاخص اختلاط کاهش می‌یابد. افت فشار نیز با افزایش سرعت، عدد وایزنبرگ و نسبت سرعت افزایش پیدا می‌کند.*

واژه‌های کلیدی میکروفلوئیدیک، میکرومیکسر T-Y شکل، سیال ویسکوالاستیک، عدد وایزنبرگ، بازده اختلاط.

مقدمه

میکروکانال‌ها دارای کاربردهای متعددی در زمینه انتقال حرارت، خنک‌کاری، اختلاط سیالات و... دارند [3-1]. میکرومیکسرها از جمله تجهیزاتی هستند که در آن‌ها از میکروکانال استفاده می‌شود که در پزشکی، صنایع شیمیایی و دارورسانی [4]، در فرایندهای شیمیایی مانند تولید بیودیزل [5] و نیز بررسی عوامل ایجاد بیماری‌ها، ساختار ژنتیکی، جداسازی و تشخیص سلول‌ها و سنتز مواد آلی [6] به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. میکرومیکسرها به دو گروه میکرومیکسرهای فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در میکرومیکسرهای غیرفعال، اختلاط از اندرکنش جریان با ساختارهای مختلف، مانند کانال‌های متقاطع، زیگزاگی و... و بدون اعمال هیچ انرژی خارجی صورت می‌گیرد [7]. در حالی که در میکرومیکسرهای فعال، اختلاط توسط محرک‌های خارجی مانند میدان الکتریکی، مغناطیسی و... صورت می‌گیرد [8]. از جمله میکرومیکسرهای غیرفعال، می‌توان میکرومیکسرهای T، Y، T-T و T-Y شکل را نام برد. نسبت به میکرومیکسرهای T و Y شکل، میکرومیکسر T-Y شکل با استفاده از دو ورودی مختلف برای هر سیال، سطح برخورد دو سیال را افزایش می‌دهد که باعث بهبود کیفیت اختلاط خواهد شد. همانند میکرومیکسرهای T-T شکل، در صورت بهره‌گیری از سرعت‌های مختلف برای ورودی‌های T و Y، دو پمپ سرنگی مورد نیاز است تا پدیده اختلاط به صورت عملی مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که میکرومیکسر ارائه شده در کار حاضر یک میکرومیکسر T-Y شکل است، ابتدا مشخصات و ویژگی‌های مکانیزم اختلاط در هندسه‌های نزدیک به آن یعنی، میکرومیکسرهای T شکل و T-T شکل، با مرور تعدادی از

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۱۹ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

Email: m.bayareh@sku.ac.ir

مطالعات پیشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کوارتز و همکاران [9] به بررسی عددی اختلاط در میکرومیکسر T شکل سه‌بعدی در اعداد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ پرداختند. این مطالعه نشان داد که میکرومیکسر سه‌بعدی افزایش قابل توجهی در اختلاط ایجاد می‌کند و افت فشار کمتر و سطح تنش برشی مشابهی را در مقایسه با یک میکرومیکسر T شکل معمولی در کل محدوده اعداد رینولدز ارائه می‌کند. انصاری و همکاران [10] اختلاط در میکروکانال همراه با کانال‌های فرعی نامتقارن در محدوده عدد رینولدز از ۱ تا ۸۰ بررسی و دریافتند کانال‌های فرعی لوزی شکل زمانی دارای بازده اختلاط بیشتری هستند که عرض کانال اصلی سه یا چهار برابر عرض کانال فرعی باشد. دندی و همکاران [11] به بررسی اختلاط میکروکانال T-T شکل و T شکل با و بدون موانع استوانه‌ای پرداختند. نتایج عددی نشان داد که میکرومیکسر T-T شکل با موانع استوانه‌ای به طور قابل توجهی عملکرد خوبی داشته و کیفیت اختلاط بسیار خوبی را نسبت به میکرومیکسر پایه T شکل برای محدوده اعداد رینولدز ۶ تا ۷۰۰ نتیجه می‌دهد. این دستگاه همچنین در مقایسه با میکرومیکسر T-T شکل بدون موانع و میکرومیکسر T شکل با موانع استوانه‌ای اختلاط بهتری نشان داد. به دلیل وجود موانع استوانه‌ای در محل اتصال، یک جفت گردابه بزرگ‌تر در ناحیه سکون ایجاد شد. موانع استوانه‌ای در پایین‌دست باعث افزایش قابل توجهی در بازده اختلاط به دلیل جدایش و بازترکیب جریان شدند. آن‌ها اندازه موانع استوانه‌ای در میکرومیکسر T-T شکل را برای به دست آوردن عملکرد اختلاط بهتر بهینه کردند. نجی و همکاران [12] به بررسی توزیع غلظت در میکروکانال شکل Y همراه با مانع مربعی شکل برای افزایش بازده اختلاط با ایجاد جریان آشوبناک پرداختند. ویژگی‌های اختلاط با تغییر نرخ جریان از میکروپمپ‌ها و تغییر عرض کانال میکرومیکسر اندازه‌گیری شد. درصد اختلاط به آرامی با افزایش سرعت جریان افزایش یافت، اما به سرعت با کاهش عرض میکروکانال کاهش پیدا کرد. کیم و همکاران [13] به بررسی پدیده اختلاط در یک میکروکانال T شکل همراه با دندانه‌های زبر پرداختند و نشان دادند با افزایش فاصله آن‌ها بازده اختلاط افزایش می‌یابد. میلتون و همکاران [14] کیفیت اختلاط آب و متانول را در سه نوع میکروکانال در اعداد رینولدز ۰/۲ تا ۹۱ مقایسه کردند. دو میکرومیکسر دارای چهار پره بودند که منافذی با نصف و یک چهارم سطح مقطع کانال را ایجاد می‌کردند و عملکرد آن‌ها با میکرولوله ساده مقایسه شد. میکرومیکسرها دارای چهار مقطع ورودی بودند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین اختلاط مربوط به میکرولوله‌هایی است که شکاف‌های به اندازه یک چهارم سطح مقطع دارند. سولهاتی و همکاران [15] به شبیه‌سازی عددی اختلاط در میکروکانال T شکل ساده و میکروکانال موج‌دار در اعداد رینولدز صفر تا ۱۰۰ پرداختند و نشان دادند با افزایش عدد رینولدز شاخص اختلاط برای میکروکانال ساده کاهش و برای میکروکانال موج‌دار افزایش می‌یابد. نتایج عددی نشان داد که کیفیت اختلاط به طور قابل توجهی برای اتصال میکروکانال T شکل با ساختار موج‌دار، به ویژه در اعداد رینولدز بالا، بهبود می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۶] یک میکرومیکسر T شکل را برای بررسی اختلاط سریع با یک بستر سیلیکونی ساخته و به صفحه شیشه‌ای پیرکس متصل کردند تا عملکرد اختلاط آن‌ها مشاهده شود. فشارهای مختلف بر روی ورودی میکرومیکسر اعمال گردید و عملکرد اختلاط با میکروسکوپ نوری در محدوده اعداد رینولدز بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ مشاهده شد. نشان داده شد که میکرومیکسر T شکل با قطر هیدرولیکی ۶۷ میکرومتر و فشار اعمالی ۵/۵ بار برای ایجاد اختلاط کامل در کمتر از یک میلی‌ثانیه پس از تماس دو مایع کافی است.

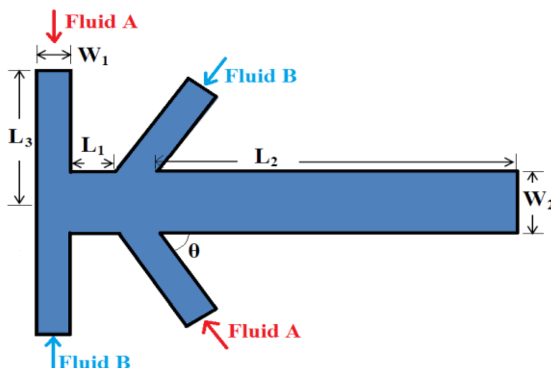
از سوی دیگر، سیالات ویسکوالاستیک به دلیل داشتن معادلات ساختاری متفاوت با سیالات نیوتنی، دارای رفتار هیدرودینامیکی کاملا متفاوتی هستند [17,18]. نسبت به پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص اختلاط سیالات نیوتنی، تعداد اندکی از محققان به بررسی مکانیزم اختلاط سیالات ویسکوالاستیک پرداخته‌اند. وی‌هوا و همکاران [19] یک میکرومیکسر کارآمد برای اختلاط سیالات ویسکوالاستیک طراحی کردند که با تعبیه چند مانع لوزی شکل، می‌توانست هم نیروی برشی و هم نیروی کششی قوی را القا کند تا جریان سیال ویسکوالاستیک را ناپایا کند. مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی مستقیم فرایند اختلاط برای ارزیابی عملکرد اختلاط انجام شد. با افزودن ذرات فلورسنت سبز به سیالات، افزایش اختلاط ظاهری برای جریان سیال ویسکوالاستیک هنگامی که سرعت جریان از یک آستانه فراتر رفت، مشاهده شد. نتایج نشان دادند که وقتی الاستیسیته به اندازه کافی قوی باشد، جریان سیال ویسکوالاستیک

به طور نامنظم در کانال می‌پیچد و نوسان می‌کند و در نتیجه اختلاط سیالات با غلظت‌های مختلف با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران [20] اختلاط محلول‌های پلی آکریل آمید را که توسط میدان الکتریکی در یک میکرومیکسر هدایت می‌شدند به صورت عددی بررسی کردند. میکرومیکسر مجهز به موانع تعبیه شده روی دیواره میکرومیکسر و ناهمگنی پتانسیل سطحی بود. شبیه‌سازی با حل معادله لاپلاس، معادله پواسون ـ بولتزمن، معادلات ناویر ـ استوکس، معادله ساختاری اولدروید ـ بی و معادله انتقال اجزا انجام شد. با افزایش پتانسیل زتای سطح مانع از ۲۰ به ۸۰ میلی‌ولت، بازده اختلاط از ۶۳/۹٪ به ۹۷/۶٪ افزایش یافت. با این حال، هنگامی که پتانسیل زتا از ۸۰ میلی‌ولت به ۱۲۰ میلی‌ولت افزایش یافت، بازده اختلاط کاهش پیدا کرد. چن و همکاران [21] اختلاط سیالات ویسکوالاستیک با معادله ساختاری اولدروید ـ بی را در یک میکرومیکسر شامل یک استوانه رسانا به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. اثرات غلظت پلیمر و شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر اختلاط محلول‌های پلی‌آکریل‌آمید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش غلظت پلیمر، سرعت کاهش و بازده اختلاط افزایش می‌یابد. بازده اختلاط محلول‌های ۲۰ تا ۴۰٪ پلی‌آکریل‌آمید بیشتر از اختلاط مایع نیوتنی بود. هنگامی که توان الکتریکی از ۱۰۰ ولت بر سانتی‌متر به ۲۰۰ ولت بر سانتی‌متر افزایش یافت، بازده اختلاط ابتدا کاهش و سپس به طور قابل توجهی برای محلول‌های پلی‌آکریل‌آمید ۱۰۰ تا ۴۰۰ پی‌پی‌ام افزایش پیدا کرد، اما بازده اختلاط برای محلول پلی‌آکریل‌آمید ۵۰۰ پی‌پی‌ام همچنان روند افزایشی داشت. وقتی که شدت میدان الکتریکی ۲۰۰ ولت بر سانتی‌متر بود، بازده اختلاط محلول پلی‌آکریل‌آمید ۵۰۰ پی‌پی‌ام به بیش از ۹۹ درصد رسید.

مطالعه مروری منابع پیشین نشان می‌دهد که اختلاط سیالات ویسکوالاستیک به ندرت مورد توجه محققان واقع شده است. کار حاضر علاوه بر معرفی میکرومیکسر T-Y شکل، اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک را به صورت عددی و با استفاده از معادله ساختاری اولدروید ـ بی مورد بررسی قرار می‌دهد. تأثیر سرعت ورودی یکسان، نسبت سرعت‌های ورودی و عدد وایزنبرگ بر بازده اختلاط ارزیابی و میزان افت فشار محاسبه و ارائه خواهد شد.

معرفی مسئله

در پژوهش حاضر اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک با غلظت‌های متفاوت در یک میکرومیکسر T-Y شکل بررسی می‌شود. شکل (۱) هندسه میکرومیکسر مورد اشاره را نشان می‌دهد. دو سیال از ورودی‌های مقابل یکدیگر وارد می‌شوند و اختلاط آن‌ها در کانال اصلی و نیز در اتصال بین ورودی‌ها صورت می‌گیرد. از آنجا که اثر زاویه بین کانال اصلی و ورودی Y شکل (زاویه θ) و نیز فاصله بین ورودی‌های T شکل و Y شکل (L_1) در بخش نتایج بررسی خواهد شد، این مقادیر به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. طبق داده‌های تجربی وی‌هوا و همکاران [۱۹]، محلول آبی با ۱۰٪ پلی‌اتیلن گلایکول با وزن ملکولی ۸۰۰۰ و ۰/۱٪ پلی‌اتیلن اکساید با وزن ملکولی ۲۰۰۰۰۰۰ که یک سیال بوگر با لزجت دینامیکی ۰/۰۱۰۹۴ Pa.s و چگالی ۱۲۰۴/۸ kg/m^3 است به عنوان سیال ویسکوالاستیک انتخاب می‌شود. همچنین، مقدار زمان تخفیف برای این محلول آبی برابر با ۰/۰۵۲ ثانیه است.



شکل ۱ طرح‌واره میکرومیکسر T-Y شکل
(L3 = 1400 µm و L2 = 3600 µm ،W1 = 200 µm ،W2 = 400 µm)

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر فرایند اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک، معادلات پیوستگی، مومنتوم و پخش جابه‌جایی با فرض جریان به صورت تراکم‌ناپذیر، غیردائم و آرام به صورت زیر بیان می‌شوند [16]:

$$\nabla \cdot u = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u\right) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \qquad (۲)$$

که u بردار سرعت، ρ چگالی، P فشار و τ مجموع تنسور تنش برشی حلال (τ_s) و محلول الاستیک (τ_p) است [19]:

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (۳)$$

که

$$\tau_s = \eta_s[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (۴)$$

در این معادله، η_s لزجت دینامیکی حلال است. تنسور تنش برشی محلول با استفاده از معادلات ساختاری سیال ویسکوالاستیک مانند اولدروید ـ بی مدل می‌شود [19]:

$$\tau_p + \lambda\left[\frac{\partial \tau_p}{\partial t} + \nabla\cdot(u\tau_p) - (u\tau_p)^T\cdot\tau_p - \tau_p\cdot(\nabla u)\right] = \eta_p[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (۵)$$

که λ زمان تخفیف سیال ویسکوالاستیک و η_p لزجت دینامیکی محلول است. معادله ساختاری اولدروید ـ بی به شکل تنسوری به صورت زیر است:

$$\tau_p = \frac{\eta_p}{\lambda}[C - I] \quad (۶)$$

که C و I به‌ترتیب، تنسور متقارن ساختاری و تنسور واحد هستند. با جاگذاری معادله (۶) در معادله (۵)، معادله (۵) به صورت زیر در می‌آید [16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\nabla\cdot C - (\nabla u)^T\cdot C - C\cdot(\nabla u) = \frac{1}{\lambda}[I - C] \quad (۷)$$

حال با استفاده از کمیات بدون بعد $\nabla^+ = D\cdot\nabla$، $u^+ = (u_x, u_y, u_z)/u_{in}$، $t^+ = tu_{in}/D$ و $p^+ = p/(\rho u_{in}^2)$ معادلات بدون بعد به صورت زیر درخواهد آمد [19]:

$$\nabla^+\cdot u^+ = 0 \quad (۸)$$

$$\frac{\partial u^+}{\partial t^+} + u^+\cdot\nabla^+ u^+ = -\nabla^+ P^+ + \frac{\beta}{Re}\nabla^{+2}u^+ + \frac{1-\beta}{Re\,Wi}\nabla^+\cdot C \quad (۹)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t^+} + u^+\nabla^+\cdot C - (\nabla^+ u^+)^T\cdot C - C\cdot(\nabla^+ u^+) = \frac{1}{Wi}[I - C] \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t^+} + u^+\nabla^+\cdot c = \frac{1}{Re\,Sc}\nabla^{+2}c \quad (۱۱)$$

که اعداد بدون بعد رینولدز، وایزنبرگ و اشمیت به‌ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{u_{in}D}{\eta_o} \quad (۱۲)$$

$$Wi = \frac{u_{in}\lambda}{D} \quad (۱۳)$$

$$Sc = \frac{\eta_o}{D_d} \quad (۱۴)$$

و β نسبت لزجت حلال به لزجت کل η_o و c بیانگر غلظت است.

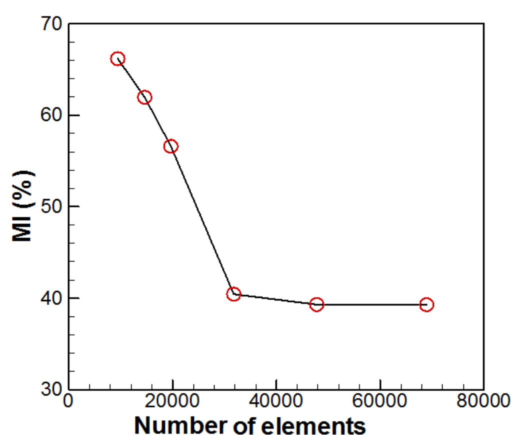
در نهایت، شاخص اختلاط با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MI = 1 - \sqrt{\frac{\iint (c-\bar{c})^2\, dA}{A\bar{c}(c_{max}-\bar{c})}} \quad (۱۵)$$

شاخص اختلاط میانگین غلظت در مقطع کانال خروجی است. A سطح مقطع کانال خروجی و c_{max} حداکثر غلظت نمونه در میکروکانال است. شاخص اختلاط صفر و ۱ به ترتیب نشان دهنده عدم اختلاط و اختلاط کامل است.

مطالعه شبکه

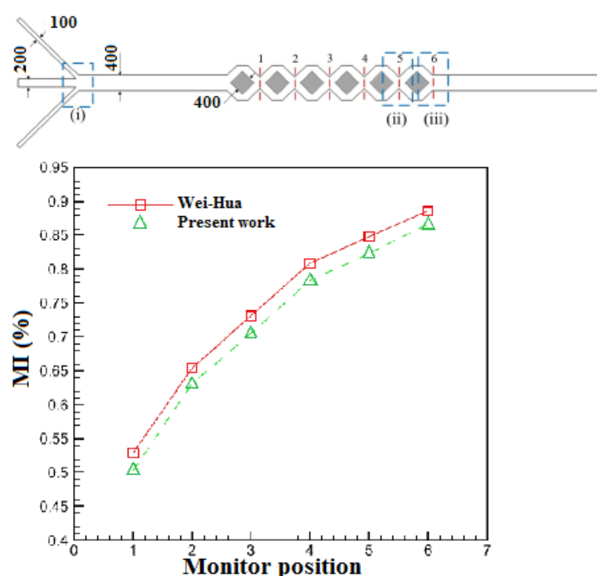
به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، پنج شبکه مختلف با عناصر مثلثی تولید شده است. شکل (۲) بازده اختلاط را برای حالتی که سرعت ورودی‌ها یکسان و برابر با ۰/۰۰۴ متر بر ثانیه و عدد وایزنبرگ برابر با ۰/۱ برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بازده اختلاط با افزایش تعداد المان‌ها از ۳۱۷۴۶ به ۴۶۷۶۳ تغییر چندانی نمی‌کند؛ بنابراین، این شبکه را می‌توان برای ادامه شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار داد.



شکل ۲ شاخص اختلاط بر حسب تعداد المان

اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از درستی روش عددی مورد استفاده، نتایج حاضر با داده‌های تجربی گزارش شده توسط وی‌هوا و همکاران [19] مقایسه می‌گردد. میکرومیکسر مورد مطالعه ایشان دارای سه ورودی بود که سیال اول از ورودی‌های جانبی و سیال دوم از ورودی میانی به درون میکروکانال اصلی تزریق می‌شدند (شکل ۳). موانع لوزی‌شکل تعبیه شده در کانال اصلی جهت افزایش بازده اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک به کار گرفته شدند. آن‌ها بازده اختلاط را به صورت عددی و آزمایشگاهی در فواصل مختلف از موانع لوزی‌شکل برای حالات مختلف به دست آوردند. در بخش شبیه‌سازی عددی، تعداد ۵۲۲۳۰ المان مورد استفاده قرار گرفت. مسأله فوق‌الذکر به صورت مشابه و با تعداد المان مساوی ایجاد و شبیه‌سازی برای حالتی که عدد رینولدز برابر با یک و عدد وایزنبرگ برابر با ۵ است صورت گرفت. شکل (۳) نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج برقرار است؛ بنابراین، روش عددی مورد استفاده دارای دقت قابل قبول برای انجام سایر شبیه‌سازی‌ها است. اختلاف موجود بین نتایج ناشی از تفاوت بین شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است. به عنوان مثال، خطا در تزریق مایعات به صورت تجربی، ساده‌سازی‌های انجام شده در کار عددی و... لازم به ذکر است که مقاطعی که در آن‌ها بازده اختلاط محاسبه شده، در شکل مشخص شده است.

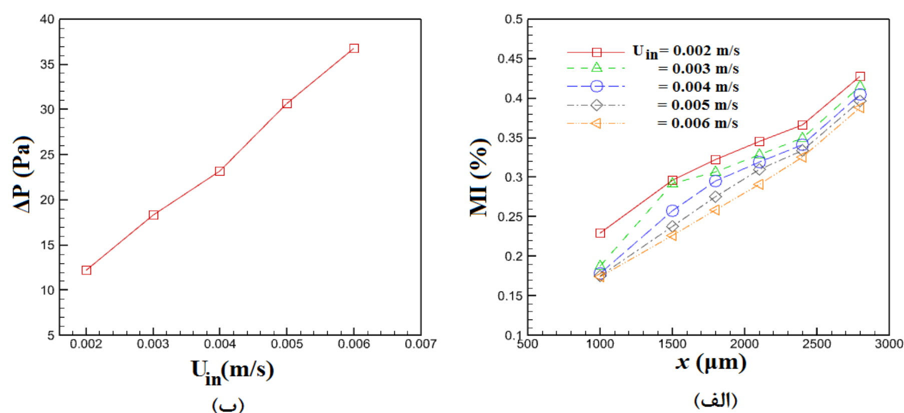


شکل ۳ طرح‌واره میکرومیکسر مورد مطالعه وی‌هوا و همکاران [19] و مقایسه شاخص اختلاط به دست آمده از کار حاضر و نتایج آزمایشگاهی وی‌هوا و همکاران [19]

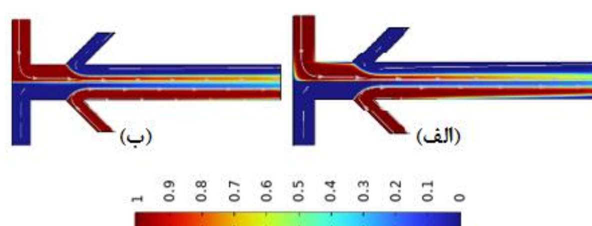
نتایج

بررسی اثر سرعت ورودی یکسان

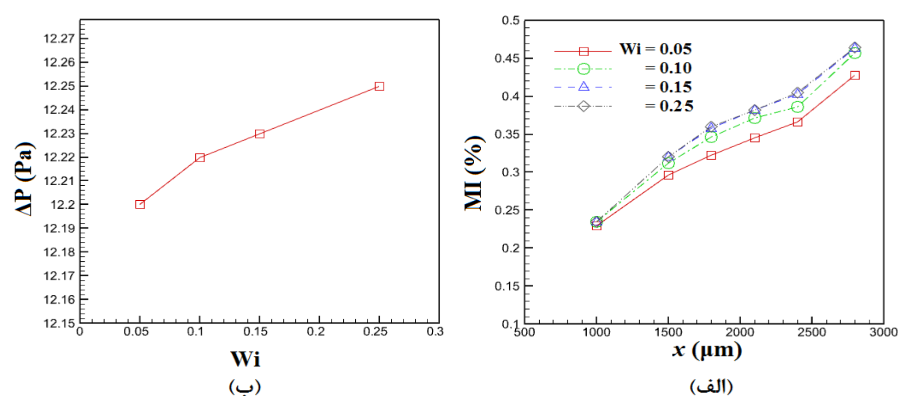
میکرومیکسر پیشنهادی دارای چهار ورودی است که دو سیال ویسکوالاستیک می‌توانند با سرعت‌های مختلف از طریق این ورودی‌ها تزریق شوند. مطابق شکل (۱)، از آنجا که به طور عملی از پمپ سرنگی جهت تزریق سیالات استفاده می‌شود، سرعت هر سیال باید یکسان باشد. در این بخش، سرعت‌های یکسان برای هر دو سیال در نظر گرفته می‌شود. در واقع، از لحاظ عملی، یک پمپ سرنگی برای تزریق سیالات کافی است. شبیه‌سازی‌ها در عدد وایزنبرگ برابر با ۰/۱ صورت گرفته است. طبق معادله (۱۳)، برای ثابت ماندن عدد وایزنبرگ و با تغییر سرعت، زمان تخفیف باید به طور مناسب تغییر پیدا کند. شکل (۴-الف) بازده اختلاط را در فواصل مختلف از طول کانال به ازای سرعت‌های ورودی مختلف و شکل (۴ ـ ب) مقادیر افت فشار را برای سرعت‌های گوناگون نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در یک فاصله معین از کانال، بازده اختلاط با افزایش سرعت ورودی کاهش می‌یابد. به طور کلی، افزایش بازده اختلاط به دلیل ناپایدار شدن حرکت جریان سیالات است. سیالات ویسکوالاستیک نظیر پلیمرها، برخلاف سیالات نیوتنی، قادر به ذخیره انرژی هستند که می‌توانند نیروی برشی قوی‌تری ایجاد کنند و تحت کشش متناوب قرار گیرند که باعث ناپایداری الاستیک می‌شود. برای مقادیر یکسان عدد وایزنبرگ، اختلاط با افزایش سرعت ورودی تضعیف می‌شود، که به معنای اثر تضعیف‌کننده اینرسی در القای ناپایداری‌های الاستیک است. از آنجا که عدد رینولدز آن‌قدر کم است که نیروی اینرسی بسیار ضعیفی را نتیجه می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که اثر الاستیک در جریان سیال ویسکوالاستیک عامل اصلی افزایش اختلاط است. همچنین، مشاهده می‌شود که افت فشار با افزایش سرعت افزایش یافته است، زیرا افت فشار میزان مصرف انرژی را مشخص می‌کند و انتظار می‌رود با افزایش سرعت، میزان مصرف انرژی افزایش یابد. شکل (۵) کانتور غلظت را برای دو مقدار سرعت ورودی حداقل و حداکثر در کار حاضر نشان می‌دهد. این شکل تأیید می‌کند که کیفیت اختلاط در طول کانال افزایش یافته است اما میزان این افزایش برای دو سرعت مختلف چندان قابل توجه نیست. همان گونه که شکل (۴ ـ ب) نیز نشان می‌دهد در فاصله ۲۸۰۰ میکرومتری از ابتدای کانال اصلی، شاخص اختلاط از حدود ۴۶٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه به حدود ۳۸٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۶ متر بر ثانیه رسیده است.



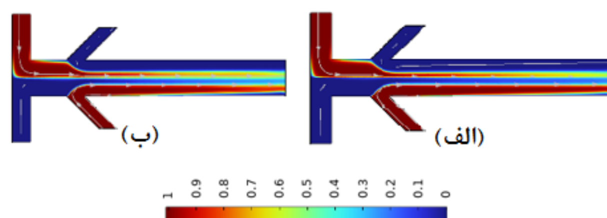
شکل ۴ (الف) شاخص اختلاط در طول کانال و (ب) افت فشار به ازای $Wi = 0.1$ و مقادیر مختلف سرعت ورودی



شکل ۵ کانتور غلظت برای $Wi = 0.1$ و (الف) $U_{in} = 0.002$ m/s و (ب) $U_{in} = 0.006$ m/s



شکل ۶ (الف) شاخص اختلاط در طول کانال و (ب) افت فشار به ازای $U_{in} = 0.002$ m/s و مقادیر مختلف عدد وایزنبرگ



شکل ۷ کانتور غلظت برای $U_{in} = 0.002$ m/s و (الف) $Wi = 0.05$ و (ب) $Wi = 0.25$

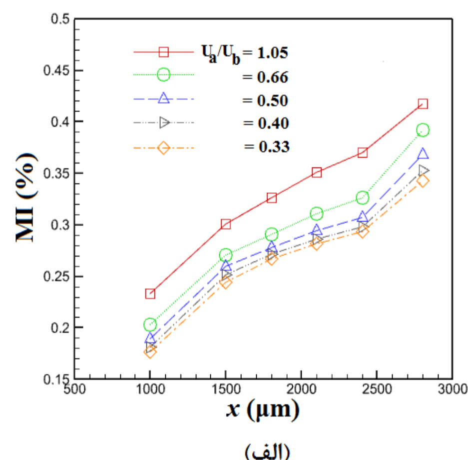
بررسی اثر عدد وایزنبرگ

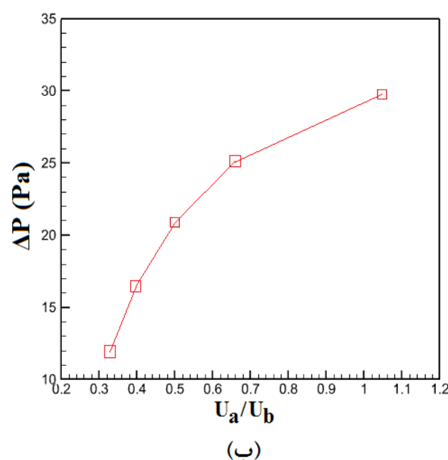
در این بخش، اثر عدد وایزنبرگ بر شاخص اختلاط و توزیع فشار در یک سرعت معین بررسی می‌شود. شکل (۶ـ الف) نشان می‌دهد با افزایش عدد وایزنبرگ، شاخص اختلاط در مقاطع مختلف میکروکانال افزایش می‌یابد زیرا در اعداد وایزنبرگ بزرگ‌تر، ناپایداری سیال ویسکوالاستیک بیشتر می‌شود. به طور

کلی، حرکات جریان آشوبناک به طور مداوم در محل اتصال ورودی‌ها ایجاد می‌شود. جریان آشوبناک ابتدا در محل اتصال ورودی‌ها ایجاد می‌شود. پس از آن، در کانال مستقیم، بر خلاف حالت لایه‌ای در سیالات نیوتنی، جریان سیالات ویسکوالاستیک با غلظت‌های مختلف به صورت نامنظم‌تری حرکت می‌کنند. در نتیجه، انتقال جرم سیالات و کیفیت اختلاط آن‌ها بیشتر می‌شود. به‌عبارت دیگر، افزایش عدد وایزنبرگ به معنی افزایش انتقال جرم لایه‌های سیال است. در محدوده اعداد وایزنبرگ بررسی شده در کار حاضر، افزایش شاخص اختلاط چشم‌گیر نیست. وی‌هوا و همکاران [19] به طور تجربی نشان دادند که سیالات ویسکوالاستیک در اعداد وایزنبرگ مرتبه ۱۰ نوسانات بسیار بزرگ‌تری را نشان می‌دهند. شکل (۶ ـ ب) نیز نشان می‌دهد افت فشار با افزایش عدد وایزنبرگ یا به عبارتی افزایش زمان تخفیف زیاد می‌شود، اگر چه که این افزایش بسیار ناچیز است. کانتورهای غلظت نشان داده شده در شکل (۷) نیز تأیید می‌کند افزایش عدد وایزنبرگ از ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ تأثیر چندانی بر کیفیت اختلاط ندارد.

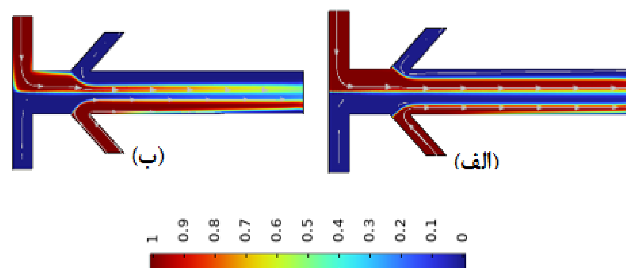
بررسی اثر نسبت سرعت

از آنجا که میکرومیکسر پیشنهادی دارای دو ورودی برای هر سیال است، می‌توان با تغییر نسبت سرعت‌ها، شاخص اختلاط را ارزیابی کرد. در عمل، استفاده از دو پمپ سرنگی برای نسبت سرعت‌های متفاوت الزامی است. در این بخش، اثر نسبت سرعت بر شاخص اختلاط و افت فشار دو سیال ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۸ ـ الف) نشان می‌دهد که با کاهش نسبت سرعت، شاخص اختلاط کاهش می‌یابد. جریان آشوبناک ایجاد شده در محل اتصال ورودی‌ها با کاهش نسبت سرعت تضعیف می‌شود و همین کاهش انتقال جرم موجب کاهش کیفیت اختلاط می‌گردد. انتظار می‌رود که با کاهش نسبت سرعت و کم شدن نیروی اینرسی، افت فشار کاهش یابد که شکل (۸ ـ ب) مؤید این مطلب است. با افزایش کانتور غلظت ارائه شده در شکل (۹) نیز به وضوح نشان می‌دهد با افزایش نسبت سرعت ورودی‌ها، شاخص اختلاط افزایش پیدا می‌کند.





شکل ۸ (الف) شاخص اختلاط در طول کانال و (ب) افت فشار به ازای $\lambda = 0.025$ s و مقادیر مختلف نسبت سرعت



شکل ۹ کانتور غلظت برای $\lambda = 0.025$ s و (الف) $U_a/U_b = 0.33$ و (ب) $U_a/U_b = 1.05$

نتیجه‌گیری

کار حاضر علاوه بر معرفی میکرومیکسر T-Y شکل، اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک را به صورت عددی و با استفاده از معادله ساختاری اولدروید ـ بی مورد بررسی قرار داده است. تأثیر سرعت ورودی یکسان، نسبت سرعت‌های ورودی و عدد وایزنبرگ بر بازده اختلاط ارزیابی و میزان افت فشار محاسبه و نتایج زیر به دست آمد:

۱. در یک فاصله معین از کانال، به دلیل ناپایدار شدن حرکت جریان سیالات بازده اختلاط با کاهش سرعت ورودی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در فاصله ۲۸۰۰ میکرومتری از ابتدای کانال اصلی، شاخص اختلاط از حدود ۴۶٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه به حدود ۳۸٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۶ متر بر ثانیه رسیده است.

۲. با افزایش عدد وایزنبرگ، شاخص اختلاط در مقاطع مختلف میکروکانال افزایش می‌یابد زیرا در اعداد وایزنبرگ بزرگ‌تر، ناپایداری سیال ویسکوالاستیک بیشتر می‌شود.

۳. در یک فاصله معین از کانال، بازده اختلاط با افزایش سرعت ورودی کاهش می‌یابد. به طور کلی، افزایش بازده اختلاط به دلیل ناپایدار شدن حرکت جریان سیالات است.

۴. افت فشار نیز با افزایش سرعت، عدد وایزنبرگ و نسبت سرعت افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌نامه

میکروفوئیدیک	Microfluidics
میکرومیکسر	Micrmixer
عدد وایزنبرگ	Weissenberg number
عدد رینولدز	Reynolds number
معادلات ناویر ـ استوکس	Navier-Stokes Equations
اولدروید ـ بی	Oldroyd-B
شاخص اختلاط	Mixing index
سیال ویسکوالاستیک	Viscoelastic fluid

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] F. Moradi, P. Pournadri, “Simulation of nanofluid flow at low Reynolds number in a microchannel with one-way source expansion under the effect of magnetic field,” *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, Oct., pp. 85-100, 2023. (In Persian) 10.22067/jacsm.2023.79298.1143.

[2] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadushan, M. Bayareh, “Effect of adding microtube on thermal and hydrodynamic behavior of a heatsink microchannel for nanofluid flow,” *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 1, Jan., pp. 21-36, 2022. (In Persian) 10.22067/jacsm.2022.75344.1100.

[3] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadushan, D. Bahrami, M. Bayareh, “Numerical investigation of forced displacement in a microchannel Numerical investigation of forced convection in a microchannel in the presence of the slip condition and nanofluid,” *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, Dec., pp. 53-64, 2022. (In Persian) 10.22067/jacsm.2022.77928.1133.

[4] M. Bayareh, M.N. Ashani, A. Usefian, “Active and passive micromixers: A comprehensive review,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 147, p. 107771, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107771.

[5] N. Kockmann, T. Kiefer, M. Engler, P. Woias, “Convective mixinandchemical reactionsinmicrochanneL with high flow rates,” *Sensors Actuators B Chemical*, vol. 117, no. 2, pp. 495-508, 2006. https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.01.004.

[6] G. S. Jeong, S. Chung, C. B. Kim, S. H. Lee, “Applications of Micromixing Technology,” *Analyst*, vol. 135, no. 3,

pp. 460–473, 2010. https://doi.org/10.1039/B921430E.

[7] Y. K. Suh, S. Kang, “A Review on mixing in microfluidics,” *Micromachines*, vol. 1, no. 3, pp. 82-111, 2010. https://doi.org/10.3390/mi1030082.

[8] N. T. Nguyen, Z. Wu, “Micromixers A review,” *J. Micromech. Microeng*, vol. 15, no. 2, p. R1, 2004. 10.1088/0960-1317/15/2/R01.

[9] C. A. Cortes-Quiroz, A. Azarbadegan, M. Zangeneh, “Evaluation of flow characteristics that give higher mixing performance in the 3-D T-mixer versus the typical T-mixer,” *Sensors Actuators B Chemical*, vol. 202, pp. 1209-1219, 2014. https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.042.

[10] M. A. Ansari, K.Y. Kim, “Mixing performance of unbalanced split and recombine mixromixers with circular and rhombic sub–channels,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 162, no. 2, pp. 760-767, 2010. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.068.

[11] T. M. Dundi, V. R. K. Raju, V. P. Chandramohan, “Characterization of mixing in an optimized designed T-T mixer with cylindrical elements,” *Chinese Journal of chemical Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 2337-2351, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.030.

[12] T. N. T. Nguyen, M. C. Kim, J. S. Park. N. E. Lee, “An effective passive microfluidic mixer utilizing chaotic advection,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 132, pp. 172-181, 2008. https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.01.022.

[13] B. S. Kim, B. S. Kwak, S. Shin, S. Lee, K. M. Kim, H. I. Jung, “Optimization of microscale vortex generators in a microchannel using advanced response surface method,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 1-3, pp. 118-125, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.061.

[14] R. Milotin, D. Lelea, “The Passive Mixing Phenomena in Microtubes with baffle Configuration,” *Procedia Technology*, vol. 22, pp. 243-250, 2016. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.075.

[15] N. Solehati, J. Bae, A. P. Sasmito, “Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure,” *Computers & Fluids*, vol. 96, pp. 10-19, 2014. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.03.003.

[16] S. Wong, M. Ward, C. Wharton, “Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 100, no. 3, pp. 359–379, 2004. https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.02.008.

[17] W. Yuan, M. Zhang, B. C. Khoo, N. P. Thien, “On peculiar behaviours at critical volums of a three-dimensional bubble rising in viscoelastic fluids,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 293, p. 104568, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104568.

[18] L, Moreno, R. Codina, J, Baiges, “Numerical simulation of non-isothermal viscoelastic fluid flows using a VMS stabilized finite element formulation,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* , vol. 296, p. 104640, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104640.

[19] C.W. Hua, L. Y. Yao, Z. H. Na, L. Y. Ke, C. J-Ping, L. X. Bin, “An efficient micro-mixer by elastic instabilities of viscoelastic fluids: Mixing performance and mechanistic analysis,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 74, pp. 130-143, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.09.006.

[20] J. Yang, Y. Chen, C. Du, X. Guan, J. Li, “Numerical simulation of electroosmotic mixing of non-Newtonian fluids

in a micromixer with zeta potential heterogeneity," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 186, p. 109339, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109339.

[21] Y. Chen, J. Li, Z. Lv, Y. Wei, C. Li, "Mixing performance of viscoelastic fluids in an induced charge electroosmotic micromixer with a conductive cylinder," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 317, p. 105047, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2023.105047.